

線形加速器搭載の電子顕微鏡 500 kV Linac TEM の開発

Development of 500 kV Linac-TEM

永谷 幸則^a, 新井 善博^b, 三宮 工^c, 白井 忠雄^d, 相原 龍三^e, 飯島 義市^b, 永山 國昭^f
Yukinori Nagatani, Yoshihiro Arai, Takumi Sannomiya, Tadao Shirai, Ryuzo Aihara, Giichi Iijima and Kuniaki Nagayama

^a自然科学研究機構生理学研究所

^bテラベース株式会社

^c東京工業大学

^d無線テクノ科学

^e相原製作所

^f総合研究大学院大学

要旨 本開発は、透過電子顕微鏡 (TEM) にマイクロ波を用いて電子を加速する線形加速器の技術を導入し、従来の直流加速方式よりも小型でコストを抑えた高加速の TEM の実現を目指すものである。線形加速器はマイクロ波の共振空洞内に生じる強い振動電場を用いて電子を加速するため、そのままではエネルギー分散は大きくなり過ぎ、電子顕微鏡に用いる事はできない。本稿では、それを解決する RF チョッパなどの技術について報告する。

キーワード：超高压電子顕微鏡、線形加速器

1. はじめに

収差補正技術の登場以前、電子ビームのエネルギーを高めた超高压透過電顕 (超高压 TEM) は軸対称レンズの球面収差と色収差の作用を抑える有力な手段として、また高加速電子ビームの強い透過力により厚い切片試料を観察する事も目的として開発されてきた。収差補正技術の登場により、一旦は超高压 TEM の意義の大半が失われたかに思われた時期もあったが、近年は位相差法と組み合わせた無染色の急速凍結生物試料の厚い切片試料のトモグラフィ計測による 3 次元立体構造の計測や、環境セルを用いた動作中の電池の透過観察など、超高压 TEM のもつ高い透過能力の必要性が高まっている。

従来、超高压 TEM では電子ビームの加速に直流 (DC) 加速方式が用いられてきた。この方式では、ビームのエネルギーの安定度 (10^{-7} 程度) が得られる反面、装置が大型かつ高額となる問題点がある。高い加速電圧を保持する電気絶縁の必要から、回路、電子銃および加速管などの装置全体を、数気圧に加圧した SF₆ 等の絶縁ガスを詰めた大型で重量のある高压タンク内に収める必要がある。1 MV の超高压 TEM の場合、高压タンクの大きさは直径約 2 m、全高約 3 m、全体の重量は 10 トンを超える。さらに、電子銃は地面の微小

な機械振動から隔離されなければならない。装置全体を除振台の上に載せなければならない。結果として、専用設計の基礎や、メンテナンス用の大型クレーンを備えた天井の高い設置室ホールなど、建物の建設までもが必要となり、10 億円を超える極めて高価な装置となっている。

このような背景の下、高エネルギー物理学の分野で開発された線形加速器の技術を電子顕微鏡に導入することにより、従来方式で要求された巨大でトップヘビーな高压タンクを不要とし、天井高とコストを半減させた「線形加速器搭載の電子顕微鏡 500 kV Linac TEM」が自然科学研究機構生理学研究所を中心とするチームにより開発されている。図 1 にその全景を示す。

線形加速器は、導体でできた円筒型の共振空洞にマイクロ波を共振させ、共振空洞の内部に生じる定在波の強い振動電場により電子を加速する装置である。複数段の空洞を適切に配置し、波乗りの加速を行なうことにより、より高い加速エネルギーに到達可能である。線形加速器を TEM に導入する過去の試みとしては、日本電子株式会社の 6X プロジェクトによる回折図形の取得^{1~3)} や、大阪大学の裏克己氏らによる検討などがある。

線形加速器を電子顕微鏡に導入する際に解決すべき最大の問題は、線形加速器により大きくなるエネルギー分散を如何に抑えるかにある。対物レンズの色収差を考慮すると、対物レンズに投入される電子ビームのエネルギー分散 ($\Delta E/E$)

〒 444-8787 愛知県岡崎市明大寺町東山 5-1
TEL: 0564-59-5290
2015 年 9 月 17 日受付

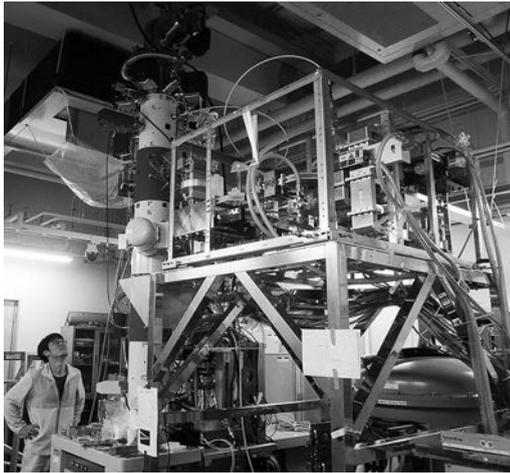


図1 装置全景. 左側が鏡筒 (中央の白色部が対物レンズ, その上下の色の濃い部分が線形加速器と線形減速器), 右側が導波管立体回路.

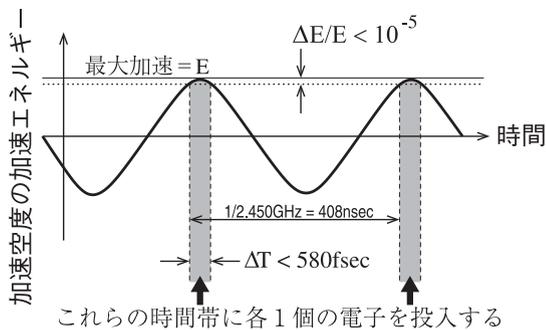


図2 加速空度の加速能力の時間変動と時間窓

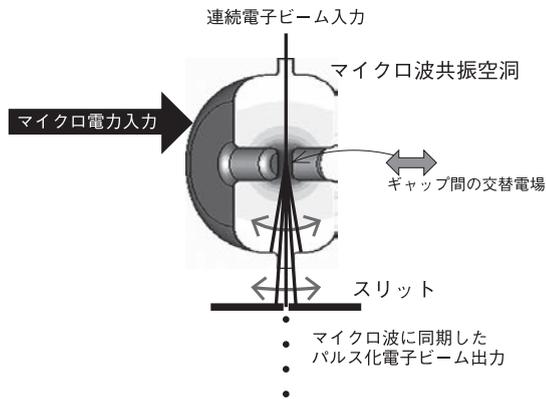


図3 RF チョップの動作原理

は 10^{-5} 程度に抑える必要がある。一方、線形加速器は共振マイクロ波の振動電場により電子を波乗的に加速する装置であり、マイクロ波の位相と個々の電子の入射タイミングとの関係 (図2) により、最大加速から最大減速までとエネルギーの振れ幅が極めて大きくなる特性をもち、そのままでは電子顕微鏡に採用することはできない。本稿では、エネルギー分散を抑える為に開発した RF チョップ (図3) の技術を中心に、本開発の内容を紹介する。

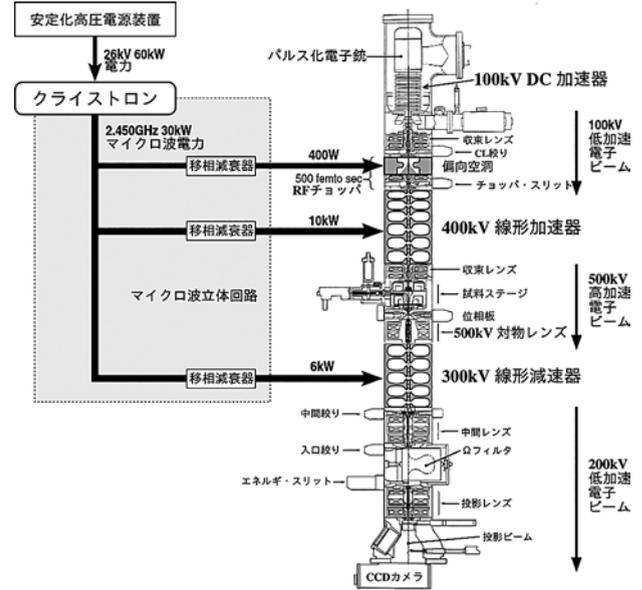


図4 全体の概略構成図

2. 技術

本開発では、市販の 200 kV TEM (日本電子製 JEM2200FS) を改造し、試料部を含む対物レンズの前後に線形加速器と線形減速器を備える構成 (図4) とした。即ち、試料には 500 kV の透過力の高い電子ビームが照射され、対物レンズのみ 500 kV の高加速の電子ビームに対応させるものの、それ以外は 200 kV 以下の低加速となる構成とした。この構成は、既に完成された低加速 TEM の高加速 TEM への改造という開発手法のため、線形加速器とその動作に関連する部分のみの新規開発に集中でき、コストと開発期間の両方を低減するアプローチとなっている。

電界放出型電子銃 (FEG) で生成した 100 keV の電子ビームを、S バンドの周波数 2.45 GHz、電力 10 kW のマイクロ波で駆動される加速能力 $\Delta E = +400$ keV の 6 空洞のサイドカップル型の線形加速器⁴⁾ で 500 keV まで加速し、500 keV 対応の対物レンズ中の試料を透過させ、像を取得・拡大し、電力 6 kW のマイクロ波で駆動される減速能力 $\Delta E = -300$ keV の 5 空洞のサイドカップル型の線形加速器で電子ビームを 200 keV まで「像を保ったまま」減速し、既存の 200 kV TEM の中間レンズ系に投入し、最終的には CCD カメラで像を得る、という基本的な構成をとっている。線形加速器および線形減速器を駆動するマイクロ波は、1 台のクライストロンで生成し、導波管で伝達され、相対位相と振幅を調整した上で各空洞へと分配される。

電子ビームのエネルギー分散は線形加速器で生じるものが支配的となるが、その原因は (1) 線形加速器への電子の入射タイミングによるもの、と (2) 線形加速器へのマイクロ波電力のゆらぎによるものに分解され、その両方への対策が必要となる。

2.1 RF チョップ

線形加速器を構成するマイクロ波共振空洞の加速能力曲線(図2)を見ると、マイクロ波の1周期(408p秒)に1回のタイミングで最大加速が得られるが、その時点の前後の曲線は放物線 $E(t) \approx E_{\text{peak}}(1 - (\omega t)^2/2)$ となっており、最大加速の付近のタイミングのみに電子を投入すればエネルギー分散を抑える事が可能と分かる。最大加速からのずれを $\Delta E/E = 10^{-5}$ に抑えるには、許容位相角度幅 $\omega \Delta t \approx \sqrt{8\Delta E/E} \approx 2\pi/700$ より、電子の入射をマイクロ波周期の約 1/700、位相角度にして 0.5 度の時間窓 (581f 秒) にのみ制限すれば良い。

本開発では、マイクロ波の毎周期の時間窓にのみ電子ビームを入射するために、株式会社 AET と共同してマイクロ波で駆動される RF チョップ(図3)を開発した⁴⁾。これは線形加速器を構成する RF 空洞と同等の空洞(チョップ空洞)に、空洞内の交替する加速電場に対して直交する方向から電子ビームを入射し、空洞内の共振マイクロ波に同期してビームを左右に偏向させ、スリットで中央部分だけを切り出す事により、マイクロ波と同期した短パルスの電子ビームを生成するものである。パルス幅は、チョップ空洞への投入マイクロ波電力とスリット幅により決定される。

RF チョップ、加速空洞および減速空洞のタイミングの調節は、図4に示す様に、1台のクライストロンからのマイクロ波出力を分波し、其々の空洞に位相と振幅を調節する機械式の移相減衰器を備える事により調整される。このマイクロ波の調節機構は、電動式ショートプランジャ、ハイブリッド結合器、サーキュレーターよりなる導波管立体回路で構成されており、TEM 鏡筒の右横(図1右側の直方体シャーシ)に設置されている。

2.2 高安定のマイクロ波源

本開発で使用した連続波クライストロン(東芝電子管デバイス社製 E3739B, 2.45 GHz, 定格 30 kW マイクロ波出力)は、直流電力(26.5 kV, 60 kW)により駆動される。線形加速器および減速器を構成する共振空洞の最大加速能力は投入マイクロ波電力の2乗根に比例し、クライストロンのマイクロ波電力出力はクライストロン印加電圧の5/2乗に比例することから、要求される 10^{-5} の加速安定度を得るには、クライストロン電源に対し電圧安定度として $\Delta V \sim 200$ mV が要求される。本開発では、株式会社 IDX の協力を得て、この安定度要求を満たすインバーター方式の電源装置の開発に成功した。

2.3 マイクロ波の鏡筒への非接触給電

マイクロ波は鏡筒右横の立体回路から其々の空洞に伝達されるが、大出力マイクロ波の伝達には導波管が不可欠となる。しかしながら、鏡筒本体は防振のためエアサスペンションにより数 mm 程度浮上させており、剛性の高い導波管による直接接続とは相容れない。これを解決するため、数 mm ほどの空隙を経てマイクロ波電力を導波管から導波管に伝達するチョークフランジを採用している。

2.4 鏡筒の温度管理と電子銃のパルス化

400 kV の加速と 300 kV の減速には合計 20 kW 弱のマイ

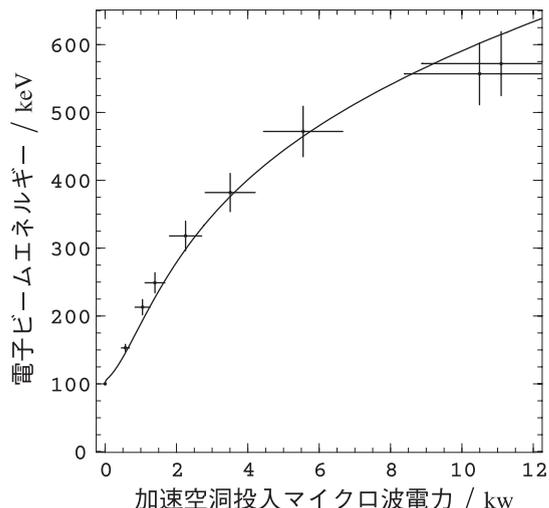


図5 電子ビームのエネルギーの投入マイクロ波電力への依存性(実測値)。実線はシミュレーション結果。

クロ波の給電が必要となる。電子ビームへのビームロード(~ 40 μ W)はほとんど無視でき、ほぼすべて純銅製の空洞表面で熱に変換される。大量の冷却水による冷却が必要となるが、流速の増大は振動の原因となるため、空洞に多数の小配管を配置し、個々には振動を生じさせない程度の冷却水を並列に流している。しかしながらこの方法をして、空洞を適切な温度に保つには不足であり、クライストロン駆動を 60 Hz 線返し時間デューティ比 30% 程度に抑え、マイクロ波が空洞に満たされている間だけビームを導入する方式を採用した。このため、引き出し電圧の変調によりビームのパルス化が可能な 100 kV 電界放出型パルス化電子銃を新規に開発した。

また、空洞は温度変化による形状変化により共振周波数に変動(1°C あたり 40 kHz 程度)する特性をもっている。加速を安定させるため、其々の空洞に導入される冷却水を加熱するヒーターを設置し、最適共振状態となるよう空洞をモニタしながら冷却水温度を微調節する方式を採っている。

3. まとめ

現時点においては基本原理の動作確認と 500 kV 加速ビームによる初期的な顕微鏡像の撮影に成功している。図5に金格子の回折図形のスポット間隔の変化から計測した、試料照射の電子ビームのエネルギーの測定結果の投入マイクロ波電力への依存性を示す。生理学研究所の全国共同利用施設としての供用開始に向けて、目標とする分解能を得られる様、改良を行なっている。

謝 辞

基盤となった電子顕微鏡の導入には日本電子株式会社の原田嘉晏前社長、岩槻正志氏、須田聡氏にご協力を頂いた。電源装置開発には、株式会社 IDX の山本岳氏、中山雄司氏、

津布久卓美氏にご協力を頂いた。マイクロ波共振空洞の開発には株式会社 AET の Ralf Weber 氏，田辺英二社長，水島弘二氏にご協力を頂いた。初期技術検討では大阪大学の楊金峰氏，理化学研究所の西谷智博氏，SPring8 の富沢宏光氏に協力を頂いた。また，生理学研究所の小原正裕氏などその他多くの方々に協力いただいた。ここに深く謝意を表す。

文 献

- 1) Watanabe, M., Ohta, T., Anazawa, N. and Kato, S.: *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **7**, 412 (1974)
- 2) Anazawa, N., Aihara, R. and Ohta, S.: *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **8**, 971 (1975)
- 3) 穴澤紀道，相原龍三：日本物理学会誌，**30**，50 (1975)
- 4) Tanabe, E., Weber, R. and Nagatani, Y.: Proceedings of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1325 (2012)